

机械系统 可靠性维修及 决策模型

○ 吴波 丁毓峰 黎明发 编著



化学工业出版社

机械系统可靠性维修 及决策模型

吴 波 丁毓峰 黎明发 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对机械系统可靠性维修及决策模型作了较全面、详细的论述，重点突出工程应用。主要内容有机械系统故障的概念及其故障分析方法，机械系统可靠性维修，机械系统预防性维修周期决策与维修策略，机械系统维修分配和维修预测。

本书对工程技术人员和从事机械工程及其相关专业的教师、研究生和学生均有较大的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械系统可靠性维修及决策模型/吴波，丁毓峰，黎明发编著. —北京：
化学工业出版社，2006.12
ISBN 978-7-5025-9599-9

I. 机… II. ①吴…②丁…③黎… III. 机械系统-故障修复 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 151144 号

责任编辑：程树珍 李玉晖
责任校对：凌亚男

文字编辑：钱 诚
装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：北京云浩印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 12½ 字数 306 千字 2007 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

可修机械系统的使用性是衡量机械系统质量的一个重要指标,而且随着科学技术的飞速发展,对机械系统的使用要求也日益提高。自20世纪80年代以来机械可靠性与维修性技术在中国得到广泛的应用,机械系统的可靠性与使用性越来越受到重视,有关部门制订了一系列标准和规范,例如对研制的新机械系统必须给出衡量其可靠性与维修性水平的数值指标。

提高机械系统的可使用性,只有首先从设计、制造上保证机械系统的固有可靠性和维修性,然后才能在实际使用中制定出合理规范的机械系统维修策略。对工程技术人员来说,从事机械系统可靠性维修的设计、预测、评价及维修策略制定是提高机械系统使用性的惟一途径,而机械系统的维修性设计、预测、评价及维修策略制定是基于机械系统可靠性维修及决策模型进行的。目前,国内关于机械系统可靠性维修及决策模型的著作尚难找到。

本书着重对机械系统可靠性维修及决策模型做了较全面、详细的论述,且重点突出工程应用。主要内容如下。

(1) 机械系统故障的概念及其故障分析方法 重点介绍机械系统故障的各种定性与定量的分析方法,这些方法是经过验证,准确、可行和有效的。

(2) 机械系统可靠性维修 重点介绍机械系统可靠性维修的基本思想、原理、维修方式、维修体制、维修方式决策和机械系统的维修性指标的概念和方法。

(3) 机械系统预防性维修周期决策与维修策略 重点介绍机械系统在各种预防性维修方式下的最优维修周期的确定和机械系统的各种维修策略。

(4) 机械系统维修分配和维修预测 重点介绍将机械系统维修性定量指标分配给机械系统零部件的分配数学模型和机械系统维修性的预测模型。

因此,本书对工程技术人员和从事机械工程及其相关专业的教师、研究生和学生均有较大的参考价值。

本书由吴波、丁毓峰、黎明发编写,石国新、陈刚、娄旭红硕士协助收集、整理了大量的资料和部分章节的绘图工作;本书在编写过程中还引用了一些作者的资料,在此一并致谢。

由于水平有限,书中难免存在不足,恳请读者批评指正。

作者
2006年9月

目 录

第 1 章 机械系统的故障及故障分析	1
1.1 故障及其分类	1
1.1.1 故障	1
1.1.2 故障的分类	1
1.2 故障模式、原因与机理	2
1.2.1 故障模式	2
1.2.2 故障原因	3
1.2.3 故障机理	4
1.3 故障率与故障率曲线	5
1.3.1 故障率	5
1.3.2 故障率曲线	5
1.4 机械系统的故障模式、影响及危害度分析	6
1.4.1 机械系统的故障模式、影响分析	7
1.4.2 机械系统的故障危害度分析	11
1.4.3 FMECA 与 FTA 的综合分析法	15
1.5 机械系统故障模式、影响与模糊危害度分析	16
1.5.1 机械系统的失效模式、影响模糊评估分析	16
1.5.2 故障模式影响与模糊危害度分析	18
1.6 机械系统的故障树分析方法	22
1.6.1 故障树分析方法的基本概念	22
1.6.2 故障树的定性分析	25
1.6.3 机械系统故障树的定量分析	27
参考文献	31
第 2 章 机械系统的可靠性维修	33
2.1 机械系统可靠性维修的基本概念	33
2.1.1 机械系统维修的基本概念	33
2.1.2 “以可靠性为中心”的机械系统维修理论	43
2.2 机械系统的维修方式决策模型	45
2.2.1 逻辑分析决策模型	45
2.2.2 模糊分析决策模型	45
2.3 机械系统可靠性维修评价指标	47
2.3.1 机械系统维修性评价指标	47
2.3.2 机械系统的维修性预测与评估	51
2.3.3 机械系统的维修性、可靠性与有效性的关系	52
2.4 机械系统故障时间与维修时间分布模型	54

2.4.1 指数分布模型	54
2.4.2 正态分布模型	56
2.4.3 对数正态分布模型	58
2.4.4 威布尔分布模型	60
2.4.5 伽马分布模型	63
2.4.6 二项分布模型	64
2.4.7 泊松分布模型	65
2.4.8 极值分布模型	66
2.5 马尔可夫随机过程与系统的状态转移	66
2.5.1 随机过程的基本概念	66
2.5.2 马尔可夫随机过程的概念	67
参考文献	68

第3章 典型机械系统维修性计算模型

3.1 马尔可夫型机械系统维修性计算模型	69
3.1.1 马尔可夫型机械系统维修性通用计算模型	69
3.1.2 单零部件机械系统维修性计算模型	70
3.1.3 串联机械系统维修性计算模型	72
3.1.4 并联机械系统维修性计算模型	74
3.1.5 表决机械系统维修性计算模型	78
3.1.6 冷储备机械系统维修性计算模型	79
3.2 机械系统更新过程理论模型	82
3.2.1 更新过程理论的基本概念	82
3.2.2 机械系统常更新过程与交替更新过程	84
3.2.3 典型机械系统维修性计算模型	85
参考文献	88

第4章 机械系统的预防性维修周期

4.1 预防性维修的基本维修方式与维修策略	90
4.1.1 机械系统的2种基本维修更换方式	90
4.1.2 机械系统的2种基本预防维修策略	91
4.2 机械系统的预防性维修周期计算模型	91
4.2.1 根据安全性要求计算预防性维修周期	91
4.2.2 根据经济性要求计算预防性维修周期	94
4.2.3 根据最大有效度要求计算预防性维修周期	95
4.3 机械系统的视情维修检测周期计算模型	97
4.3.1 根据安全性要求确定视情维修检测周期	97
4.3.2 根据经济性要求确定视情维修周期	98
4.4 用蒙特卡罗法确定最佳预防性维修周期	99
4.4.1 蒙特卡罗法确定最佳预防性维修周期原理	99
4.4.2 抽样的一般方法	100

4.4.3 蒙特卡罗法确定最佳预防性维修周期的计算步骤	101
4.5 预防性维修周期模糊决策方法	102
参考文献	103

第5章 机械系统的维修策略模型	104
5.1 机械系统的预防性维修策略模型	104
5.1.1 机械系统的几种简单维修	104
5.1.2 机械系统的定龄更换维修策略模型	105
5.1.3 机械系统的定期更换维修策略模型	108
5.1.4 机械系统的周期维修策略模型	109
5.1.5 机械系统的综合维修策略模型	110
5.1.6 机械系统含不完全预防性维修的周期策略模型	111
5.1.7 机械系统的通用维修策略模型	114
5.2 机械系统的视情维修检测策略模型	119
5.2.1 周期性检测策略模型	119
5.2.2 最佳检测时间策略模型	120
5.2.3 最佳检测、维修综合策略模型	121
5.2.4 连续时间检测维修策略模型	123
5.3 机械系统的维修备件策略模型	123
5.3.1 维修与备件的关系	123
5.3.2 机械系统维修备件储备量决策模型	124
5.3.3 备件储备与控制策略	125
参考文献	126

第6章 机械系统维修性分配与预计模型	128
6.1 机械系统的维修性分配模型	128
6.1.1 机械系统维修性分配的目的、时机及步骤	128
6.1.2 机械系统维修性分配通用模型	129
6.1.3 机械系统基于稳态有效度的维修性分配模型	134
6.2 机械系统维修性预测模型	138
6.2.1 机械系统维修性预测参数与预测模型选择	139
6.2.2 机械系统维修性预测模型	140
参考文献	147

第7章 机械系统数字化维修技术及应用	148
7.1 机械系统数字化维修概述	148
7.1.1 数字化维修的基本概念	148
7.1.2 数字化维修的研究和应用现状	149
7.2 机械系统数字化维修体系结构	150
7.3 机械系统维修信息管理系统	151
7.4 面向维修的机械系统数字化设计技术	152

7.4.1	几何建模技术	152
7.4.2	特征建模技术	155
7.4.3	数字化维修机械系统集成建模技术	156
7.5	机械系统维修工艺自动生成技术	157
7.5.1	维修零部件加工工艺自动生成技术	158
7.5.2	维修机械系统拆装工艺自动生成技术	163
7.6	机械系统数字化维修智能决策支持技术	164
7.6.1	机械系统数字化维修智能决策技术	164
7.6.2	基于网络的机械系统维修向导技术	166
7.7	机械系统数字化维修系统设计实现和应用	167
7.7.1	数字化维修系统的开发平台和工具	167
7.7.2	数字化维修系统的功能组成	168
7.7.3	机械系统数字化维修系统的实现和应用	169
	参考文献	179

附录 1	标准正态分布积分表	181
------	-----------------	-----

附录 2	标准正态分布概率密度函数值	190
------	---------------------	-----

第1章 机械系统的故障及故障分析

1.1 故障及其分类

1.1.1 故障

机械系统的故障是指机械系统丧失其规定功能的特有现象，在生产活动中会经常见到。对于不可修复的机械系统，一旦发生故障就无法修复或修复在经济上不合算，此时称之为失效；而对于可修复机械系统，故障发生后，通过维修可恢复其暂时丧失的系统功能，则称之为故障。因此，机械系统的故障是针对可修复机械系统而言的。

机械系统之所以发生故障具有多方面原因。一般机械系统，都是为了满足国民经济和人民生活需要经过一定生产过程制造出来的，都要经过机械设计、制造、安装、检验、使用与维修等复杂生产过程。在整个生产过程中，所有可能出现的缺陷与损伤都构成机械系统的故障隐患，使机械系统处于一种可能发生故障的状态，特别是在重载、高速、高温、高压等严酷条件下使用时，就更容易发生机械系统故障。

由此可知，故障是机械系统丧失规定功能的概念。此外，还应注意以下几个与故障相关联的概念，并加以区别。

(1) 事故与灾害 事故与灾害是指“机械系统故障引起的人身伤亡和物质财富的损失”，是机械系统故障引起的危害和后果，例如发生的飞机失事事故。此时，事故应理解为在飞机航行期间内，由于飞机航行故障所造成的人员伤亡或飞机本身的重大损坏，是与事故有关的。

(2) 系统安全性 所谓系统安全性是指不致引起人员伤亡或机械系统损失的概念。与安全性相对应的是险情或危险性。险情是指能引起人员伤亡、机械系统损坏和物质财富损失的显性状态或潜在状态，表征的是机械系统的故障原因。

在实质上，故障是机械系统出现事故、灾害的原因，在层次上属于上下关系和因果关系层次。事故、灾害损失的大小与机械系统的复杂程度、规模大小和技术含量有关，一般大型复杂机械系统发生故障所带来的人员和物质财富损失，远远高于一般机械系统故障所带来的损失。

1.1.2 故障的分类

机械系统在实际工作中出现的故障形式是多种多样的，某些类型的故障与其他类型的故障相比，性质可能不同，出现的危害和后果也可能不同。故为了便于研究，对机械系统的故障根据不同依据进行分类。

(1) 按故障现象分 机械系统故障可分为噪声、断裂、泄漏、振动、变形过量、破坏等故障。

(2) 按故障性质分 机械系统故障可分为破坏性故障，具体有不规则性故障和劣化性故障。破坏性故障是指机械系统在正常工作中，突然发生并且丧失其功能的故障，即突然损坏的故障。例如齿轮断齿、汽车变速器传动轴折断等现象。

不规则性故障是指机械系统由于性能不稳定而经常发生的故障；劣化性故障则是由于机械系统的功能局部弱化或机械系统功能特性值随工作时间推移发生劣化而引起的故障。例如，机械系统因零部件的疲劳累积损伤而引起疲劳强度下降，最终发生故障。机械系统功能的局部弱化或特性值劣化到什么程度才认为发生劣化故障，则要根据不同机械系统的特点，做出明确的规定。

(3) 按故障期分 机械系统故障可分为早期故障、偶然故障和耗损故障。

早期故障是指由于在机械设计、制造、装配和使用不合格零件等原因使机械系统内含缺陷，在使用初期就发生的故障；偶然故障是指机械系统在正常工作期（使用寿命期）内，随机发生的故障；耗损故障是指机械系统在使用中、后期，由于机械零部件长期使用中的磨损、疲劳或劣化使机械系统的整体可靠性降低而引起的故障，这种故障发生的概率会随使用时间的增加而增加。

(4) 按故障原因分 机械系统故障可分为误用故障、固有缺陷故障和耗损故障。

误用故障是指机械系统使用不当、使用过程中工作应力超出设计规定范围或误用而引起的故障。一般造成误用故障主要是由于操作、管理和使用人员主观因素等方面的原因而引起的；固有缺陷故障是指机械系统在规定的使用条件下工作，由于机械系统本身的固有可靠性不佳而引起的故障。引起固有缺陷故障的原因主要是机械设计与制造质量、材料与装配零部件质量、包装与运输质量等不佳。

(5) 按故障程度分 机械系统故障可分为局部故障和系统故障。

局部故障是指机械系统由于某项功能特性值超过规定数值而引起的局部功能恶化，但未导致机械系统整体功能丧失。系统故障是指机械系统某项功能特性值超出规定数值，而引起整个机械系统的功能丧失。

(6) 按故障的可预测性分 机械系统故障可分为突发性故障、渐变性故障和间歇性故障。

突发性故障是指不能通过预先检查、监测而预知的机械系统故障；渐变性故障是指可以通过预先检查、监测而预知其发生过程的机械系统故障；间歇性故障是指周期性发生的机械系统故障，即故障按一定的时间周期发生，随后又在不施加外力的条件下，自行恢复其系统功能。

(7) 按故障的关联性分 机械系统故障可分为基本故障和派生故障。

基本故障是指机械系统某项故障的发生，是由其自身原因引起的，而不是直接或间接地由其他任何故障引起的；派生故障是指由于其他机械系统故障直接或间接而引起的故障。

(8) 按故障后果或危害的严重性分 机械系统故障可分为危害性故障、严重故障和轻微故障。

危害性故障是指可能危及人身安全和造成物质财产重大损失的故障；严重故障是指可能严重降低机械系统规定功能的故障；轻微故障是指不会导致降低机械系统主要功能的故障。

1.2 故障模式、原因与机理

1.2.1 故障模式

故障模式是从故障的不同表现形态来描述故障，是故障现象的一种表征。故障模式依不同情况，也称为差错模式、险情模式、事故模式等。

一般情况下，不同类型的机械系统其故障模式也不同。机械系统的故障模式主要表现为耗损、疲劳、断裂、冲击、变形、破损等。

机械系统支承结构的故障模式有：塑性变形、松动、振动、破坏、脱落、疲劳等。

车用变速器的故障模式有：疲劳、冲击、振动、发热、齿轮断裂等。

汽车的故障模式有：耗损、疲劳、折断、冲击、变形、发动机熄火、制动跑偏等。

齿轮的故障模式有：点蚀、变形、疲劳、磨损、破裂等。

机械系统及其零部件的故障模式在实际工作中并非固定不变，它与储存、使用、维护等环境条件以及工作时间有关，且还与机械设计、制造、试验等因素密切相关。因此，若要明确一种机械系统的故障模式，就不仅要分析机械零部件本身，而且还要综合考虑机械系统、使用、维护条件和设计、制造、试验各阶段的情况，从而得到有效的信息反馈，获得机械系统准确的故障模式与故障机理。表 1.1 为机械系统可能发生的故障模式。

表 1.1 机械系统可能发生的故障模式

故障模式的类型	故障模式
损坏型故障模式	裂痕、裂纹、断裂、开路、短路、错位等
劣化型故障模式	老化、变色、变质、腐蚀、磨损等
脱落型故障模式	松动、脱开等
失调型故障模式	间隙不适、流量不当、压力不当、电压不当、行程不当等
渗漏型故障模式	渗油、渗水、漏油、漏水、漏电等
功能型故障模式	功能不正常、性能不稳定、性能下降、运动滞后、参数输出不准、失调、振动过大、温度过高、接触不良等
其他	润滑不良、断水、缺油、质量不合格等

1.2.2 故障原因

机械系统发生故障的原因，主要来自两个方面：机械系统的固有可靠性与其使用可靠性。

在机械系统的固有可靠性方面，主要有以下原因。

① 机械系统的结构设计存在潜在缺陷。例如，可靠性设计水平过低，未采取必要的减磨、防振、均载、冗余等设计方式和对策，在一定外加载荷作用下，便可能发生机械系统故障。

② 构成机械系统的零部件存在缺陷。在使用过程中，尽管使用条件符合设计规定，但由于组成机械系统的零部件可靠性不佳，也可能发生故障。

③ 制造质量低、材质不佳，给机械系统留下故障隐患（潜在故障）。

④ 运输、保管、装配不当，给机械系统带来潜在缺陷，在使用一定时间后，便可能发生显性故障。

在使用可靠性方面，发生机械系统故障的主要原因是环境条件与使用条件。

机械系统的环境条件和使用条件越苛刻，就越容易发生系统故障。湿度与温度过高、过低，振动、冲击、灰尘、有害气体等，都是对机械系统可靠性的有害因素，即都是促使机械系统发生故障的原因。尤其是温度过高，对机械系统的工作寿命影响尤其显著。其次是使用条件、工艺方法等不合理以及操作失误等。因此，机械系统的故障原因可归结为内在原因和外在原因。

(1) 内在原因 机械设计、工作、试验、寿命、劣化。

(2) 外部原因 环境条件、工作条件、使用条件、维修。

当机械系统发生故障时，通常的处理方法是首先查清故障源，然后对机械系统故障进行维修或更换。但是，为了防止机械系统故障的再次发生，提高其使用可靠性，只是反复地对发生的故障进行维修或更换是不够的，必须详细地研究机械系统的故障模式、故障机理以及它们之间的联系，搞清楚机械系统的故障过程和原因，才能真正保证机械系统的使用可靠性。这个过程称之为故障原因分析。

1.2.3 故障机理

从故障模式即机械系统故障的表现形态入手，进一步分析故障机理，这样才能解决机械系统的故障问题，提高其使用可靠性。故障机理是引起机械系统故障的物理、化学变化等内在原因。故障机理分析是寻求机械零部件发生故障的实质原因。一般故障机理依机械系统的类型、使用条件和环境条件而异。基本形态主要表现为磨损、疲劳、腐蚀、氧化、冲击、热影响等。表 1.2 是机械系统部分故障机理事例。

表 1.2 机械系统部分故障机理事例

分 类	故 障 机 理
机械状态的变化	弹性变形、塑性变形、蠕变、疲劳断裂、脆性断裂、滑移、机械振动
材料组织状态的变化	晶相变化、应力松弛
机械磨损	磨料磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损、黏着磨损、微动磨损
化学变化	腐蚀、氧化、变质、化合、还原
渗透	液体、气体

故障机理与故障模式的区别就是故障原因和故障现象的区别。通常，虽然机械系统故障的机理不同，但故障模式可以通过观测得到，而且可能具有类似的表现形式。此外，一种故障机理还会诱发另外一种故障机理，例如，由于机械零部件在工作中的磨损、发热、振动等导致的二次故障就属于这种情况。

一般可以把故障发生的过程看成是机械系统及其零部件在广义应力和工作时间因素等外因作用下，通过机械系统内因导致故障的物理、化学或机械过程的变化（故障机理），在此过程中显现出一定的故障模式（显性表现形式）。在机械系统的故障分析中不能漏掉任何故障模式，否则极易造成分析失误。弄清机械系统及其零部件各功能级别的全部可能故障模式相当重要，机械系统的整个故障模式就是建立在该故障分析基础上的。

故障模式是由故障机理所显现出来的各种故障现象或故障状态。通常即使故障机理不明，而故障模式仍是可观测得到的，不同的工作应力会分别或同时产生不同的故障机理，即由某一故障机理衍生出另一故障机理，随着时间的推移，最后可能显现出若干种故障模式。此外，即使是同一工作应力，也能同时诱发出两个以上的故障机理。例如，温度应力既可促使机械零部件表面氧化、电气性能退化，又可能因温度松弛促使材料强度的降低。

根据统计，机械系统发生的最基本故障机理主要有：断裂和蠕变，腐蚀，磨损，冲击断裂，疲劳，热影响六大类。一般情况下机械零部件及材料的故障机理和故障模式并不是固定不变的，它是储存、使用、维护等环境条件以及工作时间的函数；而且还与机械设计、制造、试验条件等密切相关；因此，在机械系统的故障机理与故障模式的分析中不仅要分析机械零部件本身，还要综合考虑机械系统的结构，才能了解和预测机械零部件及机械系统中可能出现的故障模式及其危害程度，从而采取相应的对策，预防故障的发生。

1.3 故障率与故障率曲线

1.3.1 故障率

故障率是指机械系统工作到 t 时刻后在单位时间内的故障发生概率，它反映了研究对象在任一瞬时出现故障概率的变化趋势。

故障率是描述机械系统故障规律的主要指标，其定义为机械系统在 $(0, t)$ 时间内不发生故障的条件下，在下一个单位时间内发生故障的概率，用 $\lambda(t)$ 表示

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq \tau < t + \Delta t | \tau > t)}{\Delta t} \quad (1.1)$$

$\lambda(t)$ 描述了机械系统在工作过程中由于故障引起可靠度衰变的规律，从而说明机械系统在 $t + \Delta t$ 时刻由正常转变为故障的演变特性。

1.3.2 故障率曲线

将机械系统的故障率 $\lambda(t)$ 随时间变化的函数用曲线在坐标 $\lambda(t)-t$ 上绘出，则反映了机械系统工作全过程的故障趋势变化情况。如图 1.1 所示，它反映了机械系统故障率的不同阶段与工作时间。从图中可以看出它的形状与浴盆的剖面十分相似，故又称为浴盆曲线，它反映了机械系统故障的三个特征时间期，即早期故障期、偶然故障期和耗损故障期。

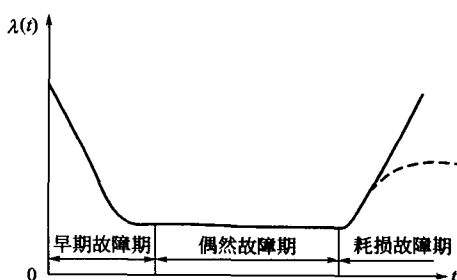


图 1.1 浴盆曲线

1.3.2.1 早期故障期

机械系统在开始工作阶段，故障率很高，但随工作时间的延长迅速下降，此阶段称为早期故障期，该期间的长短随机械系统的设计与制造质量而变。故障主要是由设计、制造上的缺陷和使用环境不当造成的，即由于人为差错等各种原因造成的，且不易查出。没有人为差错而出现本质性的早期故障现象的机械系统很少。针对这种现象，可以在机械系统出厂前，进行严酷条件下的跑合运转来加以消除。

1.3.2.2 偶然故障期

偶然故障具有即使知道可能会出现但无法预知的特点，所以往往是一种突然性故障，具有随机性。这个时期的故障率虽然多少随时间有些变动，但由于很小，所以通常看成是一个常数。可以说，这一时期是机械系统的正常工作期。偶然故障多起因于机械系统可靠性设计中的隐患、使用不当与维修不力。通过提高可靠性设计质量、改进使用管理、加强监视诊断与维护保养，可以有效降低偶然故障期的故障率。

1.3.2.3 耗损故障期

进入这一阶段，机械系统的故障率开始上升，称为耗损故障期。在此期间，机械系统经长期使用后，由于疲劳、磨损、老化等原因，工作寿命已渐近衰竭，从而处于频发故障状态，使机械系统故障率随时间推移而上升，最终会导致机械系统的功能丧失。

如果能预知机械系统零部件磨损损坏的开始时间，在此时间开始之前，进行预防性维修更换等措施，可使机械系统故障率下降，延长可修机械系统的工作寿命。

此外，随着科学技术的发展，数控机械系统、加工中心等现代化机械系统不断出现，而

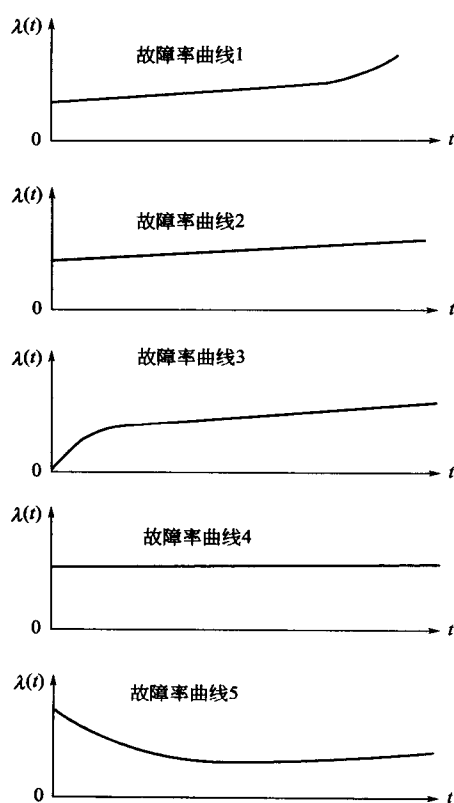


图 1.2 复杂机械系统的五种典型故障率曲线

这些精密、大型、数控等高技术含量、结构复杂机械系统的故障规律与传统的浴盆曲线相背离，促使人们对这些机械系统的故障规律进行深入研究。研究发现，除典型的浴盆曲线外，还存在五种典型故障率曲线，如图 1.2 所示。

故障率曲线 1 显示，机械系统具有恒定的或者略增的故障率，接着就是耗损故障期；据统计有 2% 的复杂机械系统遵循该故障率曲线。

故障率曲线 2 显示，机械系统具有缓慢增长的故障率，但没有明显的耗损故障期；据统计约有 5% 的复杂机械系统遵循该故障率曲线。

故障率曲线 3 显示，新机械系统从刚出厂的低故障率，急剧地增长到一个恒定的故障率，且无明显的耗损故障期，据统计约有 2.7% 的复杂机械系统遵循该故障率曲线。

故障率曲线 4 显示，机械系统在整个工作寿命周期内具有一个恒定的故障率。据统计约有 14% 的复杂机械系统遵循该故障率曲线。

故障率曲线 5 显示，开始具有较高的初期故障率，然后急剧地降低到一个恒定的或者是增长极为缓慢的故障率，且无明显的耗损故障期，据统计有不少于 68% 的复杂机械系统遵循该故障率曲线。

一般来说，复杂机械系统故障率曲线取决于机械系统的复杂程度，机械系统越复杂，其故障率曲线就越是趋向于故障率曲线 4 和 5。

1.4 机械系统的故障模式、影响及危害度分析

故障模式、影响及其危害度分析（failure mode、effects and criticality analysis, FMECA）是分析每一机械系统中所有可能的故障模式及其对机械系统所有可能的影响，并按每一个故障模式的危害程度及其发生概率予以分类的一种归纳分析方法（图 1.3）。FMECA 方法包含了故障模式、影响分析（failure mode、effects analysis, FMEA）和危害度分析（criticality analysis, CA）两大部分。

在机械系统全寿命周期的不同阶段，FMECA 应用的目的和应用方法略有不同，但是根本目的只有一个，即从机械系统设计和使用的角度发现机械系统的各种缺陷和薄弱环节，从而进一步提高机械系统的可靠性水平。

进行 FMECA 的目的是确定对机械系统的故障或人员安全有危害性影响的故障模式及其等级，为机械系统中的监控机械子系统和内部自检子系统的配置和设计提供依据，为机械系统各种故障的定量分析提供信息，并为优选方案提供参考。

要完成 FMEA（failure mode effects analysis, FMEA）与 FMECA，必须首先掌握下述资料。

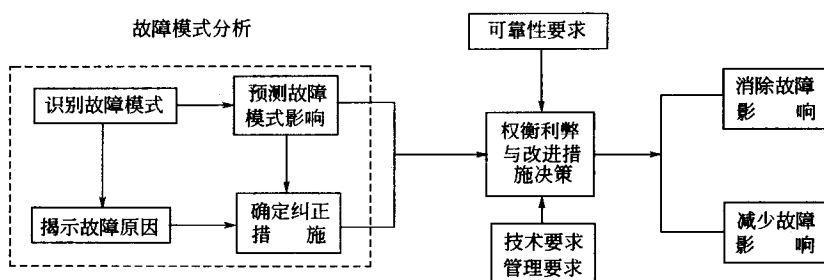


图 1.3 FMECA 分析方法

① 与机械系统结构有关的资料。必须掌握组成机械系统的各个零部件的结构特性和联结以及机械系统在整个系统中所处的地位和作用。

② 与机械系统工作、运行、控制和维护有关的资料。

③ 与机械系统所处工作环境和条件相关的资料。

1.4.1 机械系统的故障模式、影响分析

1.4.1.1 故障模式分析

故障是机械系统或者机械系统的某一部分不能完成预定功能的事件或状态，而故障模式则是故障的表现形式（或表现形态）。在机械系统的设计开发和使用过程往往是通过故障模式（即故障现象）找出故障原因。机械系统的故障往往与机械系统的功能和规定的使用条件密切相关，在对具体机械系统进行故障分析时，必须首先确定机械系统在规定功能、规定条件下发生故障的判定依据，然后才能判断机械系统的某种状态是处于故障状态还是正常工作状态。

一般机械系统可以实现多种功能，而每一种功能都可能有多种故障模式，而分析人员的任务就是找出机械系统每种功能所有对应的全部故障模式。

1.4.1.2 故障原因分析

故障模式分析只是描述了机械系统发生故障的现象，而故障原因分析则给出了机械系统发生故障的原因。故障原因有间接故障原因和直接故障原因之分。直接故障原因一般称为故障机理。

由于各种故障因素的作用，机械系统一旦发生故障后，必然带来一定的影响与损失。这种损失一般称为故障损失，而故障损失有直接损失与间接损失之分。

直接损失是指因机械系统故障而产生的原始财产损失、维修或更新的费用损失，一般机械系统故障的直接损失往往很大。

间接损失是指机械系统因故障停机造成的经济损失，由此引发其他机械系统发生故障或停机的经济损失，造成人身伤亡、引发灾难和环境污染的损失和机械系统的质量声誉的损失等。

故障损失大小与故障对象在整个系统中所处的层次有关，一般，机械系统故障对象所处层次越高，故障损失就越大。

1.4.1.3 故障影响分析

（1）层次的划分 复杂机械系统一般具有层次结构，随着机械系统设计的发展，机械系统层次划分也是不相同的。在设计的初期，由于对机械系统应该具有的具体结构还不清晰，

一般按照机械系统的功能层次进行划分。在机械系统设计开发的后期，可按照机械系统的结构进行层次划分。机械系统最上层一般称为初始层次，最低层一般称为最底层层次。机械系统层次的划分应该根据机械系统的技术成熟程度和设计开发经费的投入情况进行合理划分。机械系统划分的层次越多，FMECA的工作量也就越大，就需要花费更多的经费。需要注意的是最底层层次的划分应该至少达到对机械系统的严重故障有直接影响的层次。

(2) 故障影响的定义 故障影响是指机械系统的每一种故障模式对机械系统的自身或其他机械系统的使用、功能和状态的影响。当分析整个系统中的某一机械系统的故障模式对其他机械系统的故障影响时，通常按照预先定义和约定的层次进行分析，即不仅要分析该故障模式对该机械系统所在层次的其他机械系统造成的影响，还要分析该故障模式对该机械系统所在层次中更高层次机械系统的影响。

(3) 局部影响 局部影响是指某一子系统的故障模式对该机械系统自身和与该机械系统所在层次相同的其他机械系统的使用、功能或状态的影响。某个机械系统的故障模式可以有多个局部影响，即可以影响多个与该机械系统相同层次的机械系统或者对相同层次的某个机械系统有多个影响。

(4) 高一层次影响 高一层次影响是指某机械系统的故障模式对该机械系统所在层次的高一层次机械系统的使用、功能或状态的影响。某个故障模式一般来说都有多个高一层次影响，但是只对该机械系统所属的那一个高层次机械系统有影响，而对其他高一层次机械系统一般没有影响。

(5) 最终影响 最终影响是指整个系统中的某机械系统的故障模式对初始层次机械系统的使用、功能或状态的影响。

(6) 故障的危害程度 机械系统发生故障后，对用户及生产企业会造成一定的影响、危害和物质财产损失。因此，有必要对机械系统故障的危害程度（或严重性）进行评价。

为了对机械系统故障的危害程度进行评价，就必须有客观的判断评价标准。评价标准的具体参数或度量，一般依据机械系统性质以及机械系统故障发生的时间和空间，可取直接损失、间接损失、停工时间损失、发生频率等。但是为了综合做出评价，更多的还是根据规定的故障危害度级别做出定量的分析评价。为此，需要对机械系统的故障危害程度进行分级。

故障危害度分级通常根据机械系统的故障性质，采取不同办法来进行，通常情况将机械系统故障的危害程度分为4级，见表1.3。

表 1.3 故障的危害程度等级

危害度等级	故障性质	评 价 准 则
1	危害性故障	对机械系统和环境造成重大损害,并可能直接危及人身安全
2	严重故障	对机械系统和环境造成重大损害,并可能间接危及人身安全
3	一般故障	对机械系统与人员不会造成重大损害
4	轻微故障	不致影响机械系统的主要功能

危害性故障是指可能导致机械系统规定功能的丧失，并对机械系统和环境造成重大损害，并可能直接危及人身安全，是用户不能容忍的故障。

严重故障是指可能导致机械系统丧失规定功能，并对机械系统和环境造成重大损害，且可能间接危及人身安全，而产生用户申诉索赔的故障。

一般故障是指可能导致机械系统规定功能下降,对机械系统与人员不会造成显著损害,但会引起用户需要修理服务要求的故障。

轻微故障是指可能导致机械系统规定功能下降,但不致影响机械系统主要功能和使用的故障。

1.4.1.4 故障后果分析

机械系统发生故障时,一般会导致生产制造出来的产品质量、产量或售后服务等方面的不良后果或危害,甚至会对环境和人身安全造成损害。一般 FMEA 分析中可从机械系统功能框图上考虑哪些部分受故障的影响。

分析机械系统故障后果一般需要考虑任务目标、维修要求以及人员和机械系统安全性等方面。每种系统故障有着不同的特定后果,对机械系统的影响是不一样的,也是制定维修策略的依据。

机械系统的故障后果可以分为以下 4 种类型。

(1) 隐蔽性后果 隐蔽性后果在正常情况单独发生,这种故障对机械系统操作人员来说不是显性的。它本身对机械系统没有直接的故障后果,但会导致维修费用的产生,具有增加多重故障风险的间接后果。机械系统的隐蔽性后果与其他故障相结合时,这种故障后果可能发展成为使用性或安全性后果,会造成严重损失。所以对机械系统的隐蔽性后果进行深入分析十分必要。

(2) 安全性和环境性后果 如果系统故障造成人身伤亡或关键机械系统损坏的事故,则该系统故障就具有安全性后果。如果故障导致违反行业、地区和国家的环境保护的要求,机械系统的故障就具有环境性后果。

对具有安全性和环境性后果的故障模式,只有通过维修把故障后果的风险降低到一个可以接受的程度,这种维修工作才是有效的。

(3) 使用性后果 当系统故障直接影响到机械系统的使用功能或功能实现的程度,如产量、质量、售后服务等,就是具有使用性后果,这种系统故障后果如果体现在经济性上,就会导致制造企业的重大经济损失。

机械系统的使用性后果与安全性后果并不是完全没有关联的,当某些使用性后果发展到一定程度,也可能转化为安全性后果或者导致安全性后果的发生,所以对于使用性后果存在着界定问题,在某些范围内属于使用性后果,而超出此范围则会引起安全性后果。

(4) 非使用性后果 系统故障对于机械系统的安全、环境和使用性能没有直接的不利影响的故障后果,该系统故障后果就属于非使用性后果。对于具有非使用性后果的故障而言,如果预防性维修费用小于系统故障发生后而产生的维修费用(包含机械系统停机损失费用),那么对机械系统进行的预防性维修才有意义。反之,就应在机械系统发生故障后再做事后维修。

1.4.1.5 FMEA 与 FMECA 的列表分析法

FMEA 与 FMECA 列表分析法是根据机械系统可靠性框图将有关的故障模式、相应的故障率、故障影响等采用列表的方式来进行分析计算。

在机械系统设计和研制阶段,均可采用 FMEA 和 FMECA 来确定机械系统的所有故障模式,并尽早确定所有能造成灾难性和危害性故障的因素,以便改进设计时消除或减少这些潜在的设计缺陷。因此,在机械系统的方案设计阶段就应该进行 FMEA 与 FMECA 分析。FMEA 与 FMECA 分析实施的主要步骤如下。

① 弄清与机械系统相关的全部情况。